盐沼湿地植物的群落分类及其空间分布格局对土壤水盐的响应

马俊逸，赵成章，荀芳珍，李子琴，任 杰

(西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心，甘肃 兰州 730070)

摘要：开展内陆盐沼湿地植物群落空间分布格局对土壤水盐的响应研究，将有助于深入理解盐沼湿地植物群落的环境可塑性机制。本文采用 TWINSPAN 和 CCA 等方法，研究小苏干湖内陆盐沼湿地植物群落空间分布格局与主要环境因子之间的关系。结果表明：小苏干湖湿地植物可以分为芦苇(*Phragmites australis*)+赖草(*Leymus secalinus*)、赖草、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)+披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa*)+赖草、水麦冬(*Triglochin palustre*)+海韭菜(*Triglochin maritimum*)和线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)+阿尔泰薹草(*Carex altaica*)等 6 个群落类型，各植物群落通过适应各自区域内土壤水盐的运移规律表现出显著的空间差异性；土壤含水率、土壤 Ca^{2+}、Cl^-和地下水埋深对植物群落分布格局影响最显著。内陆盐沼湿地植物群落分布格局及其与土壤水盐因子之间的关系是湿地植物长期适应特殊生境的结果，体现了盐沼湿地植物较强的耐受性和生态适应性。

关键词：小苏干湖；盐沼湿地；群落；土壤水盐；甘肃

湿地是发育于水陆环境过渡地带的生态系统，具有独特的生态水文过程[1]，对维护生态系统功能和区域生态安全有着重要意义[2]。内陆盐沼湿地是干旱气候下地表过湿或季节性积水、土壤盐渍化并伴有盐生植物的沼泽湿地，湿地植物群落的空间分布格局不仅与植物种群的生物学性状密切相关，而且受湿地水盐运移规律和地下水位时空分异特征的影响[3-4]。植被作为盐沼湿地生态系统中最重要的组成部分之一，其空间分布结构和主要功能性状，能够表征植物种内和种间的资源生态位及其关联性，植被群落与环境因子的各种定量关系综合反映了植物种群和群落的生态适应能力及环境可塑性机制[5-7]。内陆盐沼湿地地表水呈碱性、土壤中盐分含量较高，表层积累有可溶性盐，盐沼植物群落一般以少数种为主，在空间上具有明显的植被带。地形地貌、地表积水状况、表层土壤盐分空间异质性，以及与湿地相连的湖泊、河流的水文状况，成为决定盐沼植物分布和植被地带性模式的因素[8-9]。因此，研究内陆盐沼湿地植被空间分布格局及其与土壤水盐因子的相互关系，对于认识湿地植物的生态适应性和植被群落稳定性维持机制具有重要的意义。

苏干湖湿地为封闭的山间断陷盆地，湿地生态序列基本保持原始状态，属于国家重点保护的湿地资源，在我国西北荒漠区具有典型性、代表性以及特殊的保护、科学研究价值。小苏干湖是一个具有出口的微咸水湖，该区域降水少蒸发大，在与环境的长期协同进化过程中，湿地植物在应对寒冷、干旱、盐胁迫等生境方面表现出了独特的地域性特征。目前，学术界对植物群落的分类与排序[10-11]，植物种群分异的环境解释[12-13]等方面已经做了大量研究，围绕内陆盐沼湿地物种组成与多样性[14]、水盐运移规律[15]、植被群落对地下水环境的关联[16]进行了探讨，苏干湖湿地植物多样性[17]和天然植被对地下水位的响应[18]等问题也受到了关注，但是对小苏干湖盐沼湿地土壤阴阳离子、表层土壤含水量、地下水埋深等因素共同作用下，植物群落空间分布格局和优势植物的环境适应性等方面的研究较为薄弱。鉴于此，本文采用 TWINSPAN 和 CCA 分类与排序方法，对小苏干湖内陆盐沼湿地植物群落分布及其与主要水盐环境因子间的关联性进行了分析，试图明晰水盐影响下小苏干湖内陆盐沼湿地植被空间分布特征，以及造成这种空间异质性的原因。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省阿克塞小苏干湖自然保护区，处于青藏高原柴达木盆地北缘阿尔金山、党河南山、塞什腾山和吐尔根达坂山之间的花海子高原盆地，地理位置为 39°01′25" ~ 39°05′32"N，94°10′33"~94°14′43"E，海拔 2807-2908 m，属典型的内陆高寒干旱气候，年平均气温<-0.4℃，1 月平均气温-14℃，7 月平均气温 13.8℃，年均降水量 77.6 mm，蒸发量 1964.8 mm，年日照时数 3100-3500 h，干燥度 30，无霜期 90 d 左右。苏干湖水系属柴达木内流河水系，土壤主要以草甸土、草甸沼泽土和盐土为主，主要植物有芦苇(*Phragmites*

australis)、赖草(*Leymus secalinus*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、海乳草(*Glaux maritima*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、海韭菜(*Triglochin maritimum*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、水麦冬(*Triglochin palustre*)、盐角草(*Salicornia europaea*)等。

1.2 植物群落调查

野外调查于 2018 年 8—9 月完成，在前期对该地区植被广泛考察的基础上，综合考虑湿地类型、植物覆盖等因素。在研究区共布设了 45 个 20 m×20 m 的大样方(图 1)，在每个大样方内用交叉对角线法选取 5 个 1 m×1 m 的草本小样方，详细记录样方内所有植物的高度、盖度、密度、频度和地上生物量等，共调查 225 个草本样方。用观察法描述样地基本概况，使用 GPS 测定样地位置信息。样地中涉及到的湿地类型主要是内陆盐沼、季节性咸水沼泽、沼泽化草甸、淡水泉和草本沼泽。

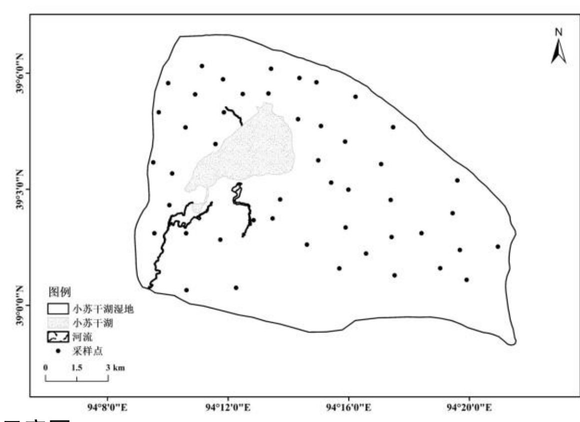


图 1　小苏干湖湿地采样点示意图

Fig.1　Schematic diagram of sampling points of wetland in Xiaosugan Lake

1.3 环境数据采集

在植物群落学调查的同时进行土壤采样，每个样方内随机选取 5 个采样点，采集 0～20cm 深度的土壤进行土壤理化性质测定。土壤全盐量采用电导法测定；土壤 K^+、Na^+采用原子吸收分光光度计法测定；Ca^{2+}、Mg^{2+}采用 EDTA 滴定法；CO_3^{2-}和 HCO_3^-采用双指示剂--中和滴定法测定；Cl^-采用 $AgNO_3$ 滴定法测定；SO_4^{2-}采用 EDTA 间接络合滴定法；土壤含水率用铝盒法测定（用 SMC 表示）；在每个大样方用铁铲挖至地下水流出，待水位稳定后测量地下水埋深[19]。

1.4 数据处理

用重要值(important value，IV)来描述物种在群落中的重要性，计算公式如下[20]：

$$IV=(\text{相对生物量}+\text{相对高度}+\text{相对盖度}+\text{相对密度}+\text{相对频度})/5$$

225 个草本样方共调查到 19 种植物，将每个样地的草本重要值取平均，最终得到 45 × 19 的样地-植物种的原始矩阵。环境因子有土壤 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、SO_4^{2-}、土壤全盐量(s)、土壤表层含水率(SMC)、地下水埋深(dep)，因此组成 45 ×11 的样地-环境因子矩阵。为了研究湿地植物与各环境因子间的关系，首先对群落进行 DCA 排序，结果表明 DCA 排序 Lengths of gradient 的第一轴值为 6.964(＞4)，因此采用基于单峰模型的 CCA 排序进行植被与环境相关性分析较为合适[21]。在进行 CCA 排序之前，为了避免冗余变量产生“弓形效应”，首先利用 Monte Carlo 检验，筛选出影响物种分布的关键环境因子[16,22-23]。

TWINSPAN 植被数量分类应用 Wintwins 2.3 软件完成。使用 Canoco for Windows 4.5 软件进行 DCA 排序、CCA 排序和 Monte Carlo 检验。

2 结果与分析

2.1 植物群落类型划分

对 45 个样地 19 种植物的重要值矩阵进行 TWINSPAN 等级分类(图 1)，并结合实际的生态现状，将研究区群落划分为 6 个群落类型(I、II、III、IV、V、VI)。用优势种和 TWINSPAN 划分的指示种对各群落类型进行命名(表 1)。

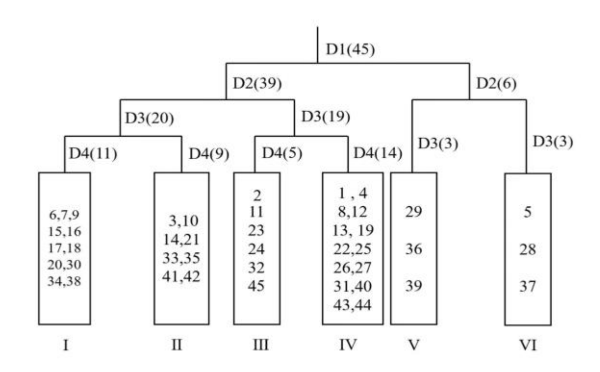


图2 小苏干湖样点TWINSPAN分类树状图

Fig.2 Dendrogram of the TWINSPAN classification of sampling points in Xiaosugan Lake

表 1 小苏干湖湿地植物群落的 TWINSPAN 分类结果

Table 1 Classification of communities using TWINSPAN in Xiaosugan Lake

序号	群落名称	总盖度	样方数	分布区域	主要植物
I	芦苇+赖草群落(Ass.*Phragmites australis* + *Leymus secalinus*)	20%~90%	11	河流湿地和盐沼湿地的低洼处	芦苇、赖草
II	赖草群落(Ass.*Leymus secalinus*)	10%~90%	8	盐沼、湖岸边缘等生境中均有分布	赖草
III	苦豆子+披针叶野决明群落(Ass.*Sophora alopecuroides* + *Thermopsis lanceolata*)	＜40%	6	多分布于离湖区较远的盐沼之上	苦豆子、披针叶野决明、赖草等
IV	盐地风毛菊+赖草群落(Ass.*Saussurea salsa* + *Leymus secalinus*)	10%~60%	14	河滩潮湿地、盐碱地和盐渍低地中	盐地风毛菊、赖草、盐角草、西伯利亚蓼等
V	水麦冬+海韭菜群落(Ass. *Triglochin palustre* + *Triglochin maritimum*)	20%~50%	3	季节性咸水沼泽	水麦冬、海韭菜、海乳草等
VI	线叶嵩草+阿尔泰薹草群落(Ass.*Kobresia capillifolia* + *Carex altaica*)	40%~80%	3	淡水泉和河流湖泊周围	线叶嵩草、阿尔泰薹草杉叶藻和矮藨草等

2.2 群落分布格局与环境因子的关系

2.2.1 环境因子筛选

在研究植被分布状况及其环境解释的过程中，环境因子越多并不能代表其结果更加准确，因为各环境因子之间也可能相互影响，对结果造成误差[22]。因此，为了避免冗余变量的影响，在进行CCA排序分析时，利用Monte Carlo检验对已经测定的11个土壤水盐因子进行显著性检验，各因子对物种分布影响的显著性见表2。结果表明土壤含水率、地下水位埋深、土壤全盐量、Ca^{2+}、Cl^-和CO_3^{2-}等6个环境因子对植物群落分布影响较大(P＜0.05)，而K^+、Na^+、SO_4^{2-}、Mg^{2+}和HCO_3^-对环境因子显著性较小(P＞0.05)。因此，选用土壤含水率、地下水位埋深、土壤全盐量、Ca^{2+}、Cl^-和CO_3^{2-}作为代理环境因子进行研究。对环境因子显著性分析等同对其进行前向选择，可以剔除无关变量对排序结果造成的影响[23]。

表2 环境因子蒙特卡罗检验及环境因子相对贡献率

Table 2 Monte carlo test results of environmental factors

环境因子	P	F	R/%
SMC	0.002**	6.32	21
dep	0.002**	4.69	14
S	0.005**	2.97	12
Ca^{2+}	0.038*	3.08	10
Cl^-	0.044*	1.4	8
CO_3^{2-}	0.046*	2.53	6
Na^+	0.116	1.51	—
SO_4^{2-}	0.212	1.13	—
K^+	0.664	1.38	—
Mg^{2+}	0.834	0.54	—
HCO_3^-	0.866	0.19	—

**，环境因子对群落物种组成的影响极显著(P<0.01); *，环境因子对群落物种组成的影响显著(P<0.05); R表示环境因子相对贡献率；S表示土壤全盐量；SMC表示土壤含水率；dep表示地下水位埋深；下同。

2.2.2 不同植物群落类型环境因子特征

小苏干湖湿地主要植物类群的环境因子特征见表 3。芦苇+赖草群落土壤全盐量较高，土壤 Cl^-含量平均值最大，表明该群落类型中植物对氯盐的耐受性较高，适宜生长在 Cl^-含量较高的区域；赖草群落是以赖草为单一优势种的群落，地下水埋深平均值最大，表明赖草习惯生长在地势较高的地方；苦豆子+披针叶野决明群落中伴生有盐地风毛菊和赖草等耐盐碱植物，群落中土壤可溶性盐总量较高，Ca^{2+}含量在所有群落中最高，表明该群落类型中植物对钙盐的耐受性较高，适宜生长在 Ca^{2+}含量较高的区域；盐地风毛菊+赖草群落中土壤离子含量低于芦苇+赖草群落和苦豆子+披针叶野决明群落，但是高于其他 3 个群落，植物分布种类也是所有群落中最多的；水麦冬+海韭菜群落土壤含水量较高，群落中植物以海乳草等泌盐植物为主；线叶嵩草+阿尔泰薹草群落中盐离子含量显著低于其他群落，而土壤含水量是所有群落中最高的，地下水埋深最浅。

表 3 各群落环境因子特征(平均值±标准误差)

Table 3 Characteristics of environmental factors in different community types.(mean ± SE)

群落类型	环境因子					
	Ca^{2+}/(g•kg^{-1})	CO_3^{2-}/(g•kg^{-1})	Cl^-/(g•kg^{-1})	S/(g•kg^{-1})	SMC/%	dep/m
芦苇+赖草	2.79±0.81	0.13±0.06	128.56±24.51	357.57±53.66	22.31±5.71	0.94±0.50
赖草	2.46±0.81	0.44±0.09	57.00±19.62	182.13±46.04	23.24±6.03	2.27±0.33
苦豆子+披针叶野决明	5.08±1.13	0.19±0.09	109.18±9.66	353.62±19.57	22.19±3.84	1.66±0.25
盐地风毛菊+赖草	3.32±0.39	0.16±0.08	55.05±6.71	257.23±20.17	22.44±3.78	1.72±0.38
水麦冬+海韭菜	2.21±0.05	0.13±0.06	70.28±1.85	195.50±13.78	35.29±1.91	0.63±0.07
线叶嵩草+阿尔泰薹草	2.07±0.48	0.16±0.07	40.88±3.58	116.99±8.47	48.41±1.58	0.41±0.16

2.2.3 CCA 排序分析

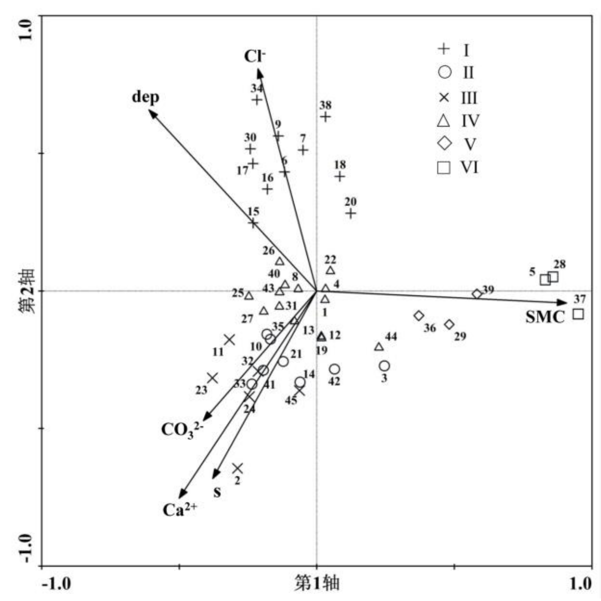
在剔除了部分冗余变量后，使用选定的6个代理变量进行CCA排序来研究湿地植被分布格局与环境的关系。由表4可知，CCA排序前2轴物种-环境因子关系总方差为65.2%，如果前3个特征向量的方差占总方差的40%以上，那么排序结果是令人满意的[24]。因此，只保留CCA的前2轴来解释植物与环境因子之间的关系。

表4 CCA各排序轴的特征值、物种-环境相关性和累积百分比方差

Table 4 Eigenvalue, correlation of species and environment, cumulative percentage variance of CCA axes

项目	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.727	0.417	0.383	0.187
物种-环境相关性	0.898	0.799	0.631	0.584
物种数据累积百分比方差	20.9	32.9	44.0	49.3
物种-环境关系累积百分比方差	41.4	65.2	87.0	97.7

采用前两轴绘制植物种类和环境因子的二维空间 CCA 排序图(图 3)。图 3 中用箭头来表示各环境因子，箭头连线的长度及其与排序轴的夹角可以代表该环境因子与排序轴的相关性大小，箭头连线越长，与排序轴夹角越小，说明该环境因子与排序轴相关性越大；反之，相关性越小[21]。



注：图中数字表示样地编号。

图 3 小苏干湖湿地植物群落 45 个样地的 CCA 二维排序图

Fig.3 Two-dimensional CCA ordination diagram of 45 quadrats of community in Xiaosugan Lake

CCA 排序轴能够反映一定的生境梯度特征，由图 3 可以看出，土壤含水率 SMC 的箭头长度较长，且与第 1 排序轴夹角很小，表明土壤含水率与第 1 轴相关性最高(*r* 为 0.8147，表 5)。与第二轴相关性较高的环境因子为土壤 Cl^-和 Ca^{2+}(*r* 分别为 0.7258 和-0.6772，表 5)，虽然全盐量 *S* 与第 2 轴夹角较小，但是连线长度较短，表明它与第 2 轴的相关性低于土壤 Cl^-和 Ca^{2+}。土壤 CO_3^{2-}的箭头连线最短，且与两个排序轴的夹角都较大，因此这个环境因子与两个排序轴相关性均较低(表 5)。同时，虽然地下水位埋深 dep 的箭头连线与两个轴的夹角较大，但是其长度是最长的，它与两个轴的相关性均相对较高(表 5)。

从排序轴来看，第1轴基本上反映各植物群落所在的水分梯度，从左到右土壤含水率渐渐增大，地下水位埋深也逐渐变浅，群落类型逐渐由苦豆子+披针叶野决明和盐地风毛菊+赖草等群落过渡到水麦冬+海韭菜群落，最后是线叶嵩草+阿尔泰薹草群落。群落类型沿第1轴的转换也体现了生境的变化规律，沿第1轴从左向右，湿地类型也逐渐由盐沼湿地向季节性咸水沼泽转换，最后变为淡水泉。排序图第2轴主要代表了土壤Cl^-和Ca^{2+}等关键离子，随第2轴从下往上，群落从土壤Ca^{2+}较高的苦豆子+披针叶野决明逐渐过渡到盐地风毛菊+赖草群落，然后是分布在季节性咸水沼泽的水麦冬+海韭菜群落和分布在淡水泉处的线叶嵩草+阿尔泰薹草群落，最后转换为土壤Cl^-含量相对较高的芦苇群落(表3)。

表5 环境因子与CCA前两轴的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between environmental factors and the first two axes of CCA

轴 Axis	Cl^-	CO_3^{2-}	Ca^{2+}	*S*	dep	SMC
1	-0.1922	-0.3706	-0.4489	-0.3394	-0.5476	0.8147
2	0.7258	-0.4241	-0.6772	-0.5476	0.5919	-0.0392

3 讨论

内陆盐沼湿地的土壤水分、盐分等因子往往在地理空间上表现出相对稳定性，深刻影响着湿地植物的组合方式以及植物种群的空间分布格局，湿地土壤、水文等自然环境因子是植物群落生态特征变化的主要影响因素，制约着生物过程发展的方向[25-26]。湿地植物种群的空间格局与土壤水盐分布特征之间存在着紧密的联系，对其响应机制进行研究有助于理解内陆盐沼湿地植物种群环境可塑性机理。

不同植物对其生长环境条件的适应性存在差异，土壤盐分和水分是影响植物生长发育的

重要因素[27-28]，环境和物种生物学特性的共同作用导致群落物种组成明显不同。小苏干湖内陆盐沼湿地植物群落结构相对简单，多呈斑块状不连续分布格局，试验过程中发现：① 水麦冬+海韭菜群落和线叶嵩草+阿尔泰薹草群落主要分布于淡水泉、河流和湖泊周围，该区域内地下水位埋深较浅(表 3)，均值不足 1 m，表层土壤水带和毛管水带长期处于连接状态，土壤经常性处于水饱和而经历物质还原反应，脱盐作用和土壤微生物的活动降低了土壤含盐量，土壤盐渍化较轻，主要发育了以线叶嵩草、矮藨草、中间型荸荠和杉叶藻等矮小植物建植的沼泽化草甸。② 苦豆子+披针叶野决明群落和盐地风毛菊+赖草群落集中分布在相对远离淡水泉和河流的盐沼湿地上，该区域在丰水期，地下水位埋深相对较浅，土壤水带和毛管水带处于连接状态，运动路径较流畅，加之蒸发量大，土壤盐分表聚；在枯水期，随着地下水位埋深的增加，土壤水带和毛管水带处于断裂状态，在强烈的蒸发作用下，大量盐分被运移并积累在根系层和地表，发育了大面积的盐沼湿地，土壤全盐量较高(表 3)，区域内植被以苦豆子、盐地风毛菊、盐角草和碱蓬等耐盐植物为主。③ 芦苇+赖草群落主要分布在河流湿地以及湖区周围低洼处，属于盐分汇集中心，生境含盐量相对较高(表 3)，在盐沼湿地中与赖草夹杂分布。赖草群落除了盐斑、裸地、湖区没有生长之外，全区广泛分布，且多分布于地势较高的台地之上。其主要原因是一方面该区域地下径流不畅，地下水位高(表 3)，矿化度高，地表积水时间较短；另一方面赖草是多年生草本，具有下伸的根状茎，秆直立且粗硬，既稍喜湿润，又颇耐干旱、耐寒，适应性较广，能适应该生境。湿地植物群落分布格局的差异性是植物通过群落重组应对复杂生存环境的结果，其可塑性变化客观地表达了植物对生境的适应性。

植物群落所处的微环境会影响植物的分布、生长以及群落的演替方向，从而改变群落结构、影响物种分布，不同环境条件的差异可以改变植物群落类型[29-30]。本研究划分的 6 种群落类型在 CCA 排序图上的散布格局吻合较好(图 3)，揭示了植被与水盐因子之间的关系，也反映了植物群落组成对异质性生境具有指示作用[31]。CCA 排序分析发现，与 CCA 第 1 排序轴相关程度较高的环境因子是土壤含水率和地下水埋深，第 2 排序轴主要与土壤盐分有关，且土壤 Ca^{2+}和 Cl^{-}是与第 2 轴相关程度较高的土壤阴阳离子(表 5)。其主要原因是：①土壤含水量作为重要的生境选择压力，能够改变植物群落环境，苏干湖盆地为一个封闭的内陆盆地，降水稀少，蒸发强烈，部分降雨渗入土壤与地下水结合，因此，地下水成为该区域植被最主要的水分来源，其深浅也限定了植被获取水分的方式，也是制约土壤水盐动态变化和植被恢复的关键因素[32]。当地下水位埋深较浅时，植物根系可以直接吸收土壤水分，该地区主要植物以线叶嵩草、阿尔泰薹草和杉叶藻等耐水淹植物为主；当地下水位较深时，地下水通过土壤空隙间毛管作用向地表输送水分，改善包气带土壤含水量，进而影响植物群落的生长状况[33]。②钙能稳定生物膜结构，保持细胞膜对离子的选择性吸收功能，在土壤盐分较高的生境中适量的 Ca^{2+}能降低质膜透性，阻止胞内 K^{+}的外渗和 Na^{+}的进入，从而提高盐沼湿地植物的耐盐性，Cl^{-}是盐生植物液泡中的重要无机离子，对细胞的渗透作用有显著影响；同时，地形高低起伏影响着盐分运移，从山麓到平原直至盆地的过程中，盐分按溶解度的大小依次沉淀[34]，在远离湖区的洪积平原，溶解度小的钙盐优先沉积，生境中主要植物群落为苦豆子+披针叶野决明群落，该群落土壤 Ca^{2+}平均含量最高(表 2)，氯化盐溶解度大，汇集于盆地低洼处，该区域主要生长了以芦苇为优势种的群落。这体现了小苏干湖内陆盐沼湿地植物群落分布格局对环境的生态适应性，也是内陆盐沼湿地植物长期适应特殊生境的结果。

4 结论

(1)小苏干湖湿地植物可以分为芦苇+赖草、赖草、苦豆子+披针叶野决明、盐地风毛菊+赖草、水麦冬+海韭菜和线叶嵩草+阿尔泰薹草等 6 个群落类型，各植物群落通过适应各自区域内土壤水盐的运移规律表现出显著的空间差异性。

(2)CCA 排序图明显反映出排序轴的生态意义，第 1 轴突出反映了水分梯度的变化，沿第 1 轴从左到右，群落类型的转变也表征了湿地类型的变化；第 2 轴主要表现了土壤 Cl^{-}和 Ca^{2+}等关键离子对植物群落分布的影响。土壤含水率、土壤 Cl^{-}、Ca^{2+}和地下水埋深这几个土壤水盐因子对小苏干湖内陆盐沼湿地植物群落空间分布影响较大。

参考文献（References）：

[1] 章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述[J]. 生态学报，2012，32(13):

4254-4260.[Zhang Guangxin. The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4254-4260.]
[2] Aber J S, Pavri F, Aber S W. Wetland Environments: A Global Perspective[M]. New York: Wiley-Blackwell, 2012: 2-7.
[3] Huijie Li, Jun Yi, Jianguo Zhang, et al. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe arid wetland, Gansu, China[J]. Water, 2015, 7(12): 2382-2401.
[4] 刘虎俊, 刘世增, 李毅, 等. 石羊河中下游河岸带植被对地下水位变化的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335-341.[Liu Hujun, Liu Shizeng, Li Yi, et al. Response of riparian vegetation to the change of groundwater level at middle and lower reaches of the Shiyang River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 335-341.]
[5] 罗金明, 王永洁, 柏林, 等. 扎龙盐沼湿地旱化特征及其对演替的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1167-1172.[Luo Jinming, Wang Yongjie, Bai Lin, et al. Effect of drought stress on succession of the Zhalong Wetland[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1167-1172.]
[6] 赵成章, 高福元, 石福习, 等. 高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6688-6695.[Zhao Chengzhang, Gao Fuyuan, Shi Fuxi, et al. *Melica przewalskyi* population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6688-6695.]
[7] 郭春秀, 刘开琳, 马俊梅, 等. 石羊河下游不同立地类型黑果枸杞种群分布格局[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 178-184.[Guo Chunxiu, Liu Kailin, Ma Junmei, et al. Distribution patterns of *Lycium ruthenicum* population in different site types in lower reaches of the Shiyang River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 178-184.]
[8] Boorman L A. The environmental consequences of climatic change on British salt marsh vegetation[J]. Wetlands Ecology and Management, 1992, 2(1-2): 11-21.
[9] McIntire EJB, Fajardo A. Beyond description: The active and effective way to infer processes from spatial patterns[J]. Ecology, 2009, 90(1): 46-56.
[10] Senay U A, Hamdi G K, Fergan K, et al. The classification of coastal dune vegetation in Central Black Sea Region of Turkey by numerical methods and EU habitat types[J]. Rendiconti Lincei, 2014, 25(4): 453-460.
[11] 张金屯. 历山自然保护区森林群落的典范主分量分析[J]. 生物数学学报, 2005, 20(2):213-218.[Zhang Jintun. Canonical principal component analysis of forest communities in Lishan Natural Reserve, Shanxi province, North China[J]. Journal of Biomathematics, 2005, 20(2): 213-218.]
[12] Etten E J B V, Fox J E D. Vegetation-environment relationships of the hamersley ranges, a mountainous desert of north-west Australia[J]. Folia Geobotanica, 2017, 52(2): 161-173.
[13] 赵鹏, 徐先英, 屈建军, 等. 民勤绿洲-荒漠过渡带白刺群落空间分布及其环境解释[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 1003-1011.[Zhao Peng, Xu Xianying, Qu Jianjun, et al. Spatial distribution of *Nitraria tangutorum* communities and its environmental interpretations in the Minqin Oasis-desert Ecotone[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(5): 1003-1011.]
[14] 陈鹏, 鲁延芳. 内陆盐沼湿地植物多样性研究——以张掖市新墩镇流泉村为例[J]. 中国园艺文摘, 2013, 29(9):65-67.[Chen Peng, Lu Yanfang. Study on the plant diversity in inland saline wetland[J]. China horticulture digest, 2013, 29(9): 65-67.]
[15] 朱文东, 杨帆. 潜水作用下土壤水盐运移过程[J]. 土壤与作物, 2019, 8(1): 11-22.[Zhu Wundong, Yang Fan. Soil water and salt transport affected by shallow groundwater[J]. Soils and Crops, 2019, 8(1): 11-22.]
[16] 朱军涛, 于静洁, 王平, 等. 额济纳荒漠绿洲植物群落的数量分类及其与地下水环境的关系分析[J]. 植物生态学报,2011, 35(5): 480-489.[Zhu Juntao, Yu Jingjie, Wang Ping, et al. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejin Desert Oasis of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 480-489.]
[17] 武发思, 葛亮, 蔡泽平, 等. 甘肃省苏干湖浮游植物多样性研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2521-2526.[Wu Fasi, Ge Liang, Cai Zeping, et al. Phytoplankton diversity of algae in Suganhu Lake in Gansu Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(12): 2521-2526.]

[18] 李影，刘康，高艳，等. 引哈济党工程对苏干湖湿地天然植被的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(2): 61-64.[Li Ying, Liu Kang, Gao Yan, et al. Influence of the Yinhajidang Project on the natural vegetation in Sugan Lake Wetland[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(2): 61-64.]
[19] 马玉蕾，王德，刘俊民，等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423-2430.[Ma Yulei, Wang De, Liu Junmin, et al. Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the YellowRiver Delta of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2423-2430.]
[20] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京：中国农业出版社，1998:1-19.[Reng Jizhou. Research Methods of Grassland Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998:1-19.]
[21] 张金屯. 数量生态学[M].第 3 版.北京：科学出版社，2018: 177-219.[Zhang Jintun. Quantitative Ecology[M]. 3nd. Beijing: Science press, 2018: 177-219.]
[22] 桂东伟，雷加强，曾凡江，等. 中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响[J]. 草业学报，2010, 19(3): 38-46.[Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, Zeng Fanjiang, et al. Effect of ecological factors on plant communities of the Cele River Basin on the north slope of the middle Kunlun mountains[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3): 38-46.]
[23] 段晓梅，白玉芳，张钦弟，等. 山西太岳山脱皮榆群落的生态梯度分析及环境解释[J]. 植物学报，2016, 51(1): 40-48.[Duan Xiaomei, Bai Yufang, Zhang Qindi, et al. Ecological gradient analysis and environmental interpretation of *Ulmus lamellosa* communities in the Taiyueshan Reserve, Shanxi[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2016, 51(1): 40-48.]
[24] Gauch G. Multivariate Analysis in Community Ecology[M]. Beijing: Science Press, 1989: 47-59.
[25] 王继伟，赵成章，赵连春，等. 内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4843-4851.[Wang Jiwei, Zhao Chengzhang, Zhao Lianchun, et al. Response of root morphology and biomass of *Phragmites australis* to soil salinity in inland saltmarsh[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13):4843-4851.]
[26] 李素清，武冬梅，王涛，等. 山西长治湿地草本植物优势种群和群落的空间格局分析[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 43-50.[Li Suqing, Wu Dongmei, Wang Tao, et al. Spatial pattern analysis of herbaceous community for dominant species and communities in Changzhi wetland, Shanxi[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 43-50.]
[27] 焦亮，关雪，刘雪蕊，等. 内陆河湿地芦苇叶功能性状特征及其对土壤环境因子的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 202-211.[Jiao Liang, Guan Xue, Liu Xuerui, et al. Functional traits of *Phragmites australis* leaves and response to soil environmental factors in inland river wetland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 202-211.]
[28] 李尝君，吕光辉，贡璐，等. 艾比湖湿地自然保护区克隆植物群落空间格局及其对水盐胁迫的响应[J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 122-128.[Li Changjun, Lyu Guanghui, Gong Lu, et al. Spatial point pattern and response of clonal plant communities to high drought and salt stress in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(1): 122-128.]
[29] 商天其，郑超超，高洪娣，等. 嵊州市公益林群落数量分类、排序及环境解析[J]. 热带亚热带植物学报，2015, 23(3): 334-342.[Shang Tianqi, Zheng Chaochao, Gao Hongdi, et al. Numerical classification, ordination and environment analysis of public welfare forest community in Shengzhou[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2015, 23(3): 334-342.]
[30] 葛丽娟，党虹，戎战磊,等. 祁连山中段植被群落的时空格局变化[J]. 干旱区研究，2018, 35(2): 346-353.[Ge Lijuan, Dang Hong, Rong Zhanlei, et al. Spatiotemporal distribution pattern of vegetation communities in the middle section of the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 346-353.]
[31] 余敏，周志勇，康峰峰，等. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释[J]. 植物生态学报，2013, 37(5): 373-383.[Yu Min, Zhou Zhiyong, Kang Fengfeng, et al. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshegou of Lingkong Mountain, Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(5): 373-383.]

[32] 席海洋，冯起，司建华，等. 额济纳盆地地下水时空变化特征[J]. 干旱区研究，2011, 28(4): 592-601.[Xi Haiyang, Feng Qi, Si Jianhua, et al. Study on spatiotemporal change of groundwater in the Ejin Basin[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 592-601.]
[33] 崔保山，杨志峰. 湿地学[M]. 北京：北京师范大学出版社，2006: 7-29.[Cui Baoshan, Yang Zhifeng. Wetlands[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2006: 7-29.]
[34] 赵可夫，李法曾，张福锁.中国盐生植物[M] .第 2 版. 北京:科学出版社, 2013: 3-13.[Zhao Kefu, Li Fazeng, Zhang Suofu. Chinese Halophytes[M]. 2nd. Beijing: Science press, 2013: 3-13.]

Response of spatial distribution and community types of wetland plants to soil moisture and salinity in the salt marsh

MA Jun-yi, ZHAO Cheng-zhang*, GOU Fang-zhen, LI Zi-qing, REN Jie
(*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: The response of the spatial distribution pattern of plant communities in inland salt marsh wetland to soil water and salt is helpful to understand the mechanism of environmental plasticity of plant communities in salt marsh wetland. Our objective was to study the relationship between the spatial distribution pattern and the main environmental factors of wetland plant communities in the inland salt marsh of Xiao Sugan Lake by using TWINSPAN and CCA methods. The results showed that there were six main community types of wetland plants in Xiaosugan lake namely: *Phragmites australis* + *Leymus secalinus*; *Leymus secalinus*; *Sophora alopecuroides* + *Thermopsis lanceolata*; *Saussurea salsa* + *Leymus secalinus*; *Triglochin palustre* + *Triglochin maritimum e* and *Kobresia capillifolia* + *Carex altaica*. The plant communities showed significant spatial differences by adapting to the migration of soil water and salt in their respective regions. Soil moisture content, groundwater depth, soil Ca^{2+} and Cl^- had the most significant effect on the distribution pattern of plant community. The distribution pattern of inland salt-marsh wetland plant community and its relationship with soil water and salt factors are the results of long-term adaptation of wetland plants to special habitats, which reflects the strong tolerance and ecological adaptability of salt-marsh wetland plants.
Key Words: Xiaosugan Lake; salt marsh wetlands；plant community; soil water and salt; Gansu

---

收稿日期：2019－11－17；修订日期：2020－01－17
基金项目：国家自然科学基金项目(41861009；41461013)
作者简介：马俊逸（1991—），男，硕士研究生，主要从事湿地生态系统研究. E-mail：zhaozc1710@163.com
通讯作者：赵成章. E-mail：zhaocz@nwnu.edu.cn